

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ МАШИНАХ ПРИ ЗАДАННОМ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ

Г. А. СИПАЙЛОВ

Широкое применение машин переменного тока, в частности асинхронных машин, в сложных регулируемых установках, внедрение переменного тока в электропривод судовых и других специальных установок вызвало необходимость изучения переходных процессов в асинхронных машинах.

Весь небольшой во времени путь плодотворного развития теории машин переменного тока можно условно разделить на 2 периода.

Первый период (примерно до 1935—40 гг.) характеризуется тем, что авторы работ, рассматривая вопросы различных способов пуска и торможения асинхронных двигателей и другие вопросы нестационарных процессов асинхронных машин, исходили, как правило, из уравнения движения электропривода и использовали упрощенное или полное уравнение вращающего момента в установившемся режиме. При учете переходных процессов электропривода они ограничивались рассмотрением лишь одной механической инерции, совершенно не рассматривая электромеханические переходные процессы, в которых, кроме уравнения движения, должны быть исследованы уравнения равновесия э.д.с. и падений напряжений в электрических цепях. Краткое содержание основных работ этого периода дано в работе [6].

Второй период характеризуется более глубоким анализом переходных процессов в асинхронных машинах, а именно:

1. Рассмотрение электромагнитных переходных процессов, обусловленных коммутационными процессами в статорной цепи (включение, переключение, короткое замыкание и др.) при условии постоянства скорости вращения ротора.

2. Исследование влияния заданного изменения скорости на характер протекания электромагнитных переходных процессов.

3. Рассмотрение динамики электропривода с учетом переходных электромагнитных процессов асинхронных машин.

4. Исследование одновременного протекания переходных электромагнитных и механических процессов (например, при пуске короткозамкнутого двигателя от генератора соизмеримой с ним мощности).

При таком анализе используется весь современный математический аппарат: операторное исчисление, метод симметричных составляющих, тензорный анализ, матричное исчисление, специальные функции и т. д.

К числу первых работ второго периода можно отнести статью Р. М. Кантор [1], в которой рассматриваются новые методы исследования переход-

ных процессов в асинхронных машинах. Автор пользуется уравнениями для результирующих намагничивающих сил статора и ротора и, применяя к ним теорему смещения операторного исчисления, получает преобразованные уравнения, решая которые, определяет переходные токи, мощность и моменты. Неточность автора заключается в смешивании метода комплексных операторных уравнений с методом симметричных составляющих.

Большим шагом вперед в изучении переходных процессов в асинхронных машинах явилась статья Е. Я. Казовского [3]. В ней, как и в последующих своих работах [4; 5], автор разработал метод определения токов, потокосцеплений и электромагнитного вращающего момента при различных переходных процессах: при включениях, набросе нагрузки, коротких замыканиях и других процессах асинхронных машин с помощью комплексных операторных уравнений.

В этих работах автор сделал первые попытки аналитического исследования влияния изменения скорости на характер протекания переходного процесса.

Как и для случая постоянной скорости, автор определяет моменты, развиваемые двигателем при линейном изменении скорости в переходном процессе, обусловленном резким изменением скорости, пользуясь комплексным изображением переменных.

В ряде практических задач, несмотря на то, что метод комплексных операторных уравнений облегчает решение и запись дифференциальных уравнений, вычислительная работа получается тем не менее настолько громоздкой, что все еще более простым оказывается численный расчет.

Сравнительно недавно наметился переход от аналитических методов анализа и расчета к графическим.

Использование круговой диаграммы для изучения переходных процессов в асинхронных машинах было предложено советскими инженерами [4; 7].

Графический метод расчета переходных процессов, вызванных резким изменением скорости, дает возможность полностью использовать преимущества комплексного изображения. При симметричном приложенном напряжении расчет базируется на обычной круговой диаграмме.

При исследовании непрерывное изменение скорости в ряде случаев заменяется ступенчатым, что позволяет для каждого участка использовать закономерности, справедливые при постоянной скорости [7].

По первым работам с применением графического метода можно отметить, что для получения результатов в конкретной задаче этот метод более нагляден и требует меньших затрат времени, а потому в тех случаях, когда не требуется особой точности, более целесообразен. Поэтому в настоящее время многие авторы при исследовании переходных процессов в асинхронных машинах прибегают к использованию графического метода.

Из аналитических методов расчета наиболее простым является метод последовательных интервалов.

В настоящей статье дается методика расчета электромагнитного вращающего момента при заданном изменении скорости и электромагнитного момента асинхронной машины, работающей в режиме тормоза на основе уравнений, изложенных в работе автора [9].

Допущения, сделанные при расчете, аналогичны принятым в работе [9].

Чтобы судить о трудоемкости вычислительной работы при расчете переходных процессов в асинхронных машинах методом последовательных интервалов по сравнению с другими аналитическими методами [3], ход расчета сопровождается численными примерами.

Расчет электромагнитного вращающего момента асинхронного двигателя при ускорениях ротора

Влияние изменения скорости на характер протекания электромагнитных переходных процессов имеет существенный практический интерес. Ускорение ротора вызывает значительные вращающие моменты, которые могут заставить обычную асинхронную машину на время достигать скорости вращения выше синхронной.

Этому вопросу за последние годы уделяется большое внимание со стороны специалистов по электрическим машинам [3—8].

Однако, ввиду сложности вопроса, все авторы [3—8], исследуя влияние ускорения, кроме общепринятых допущений, как правило, пренебрегают активным сопротивлением обмотки статора, тогда как оно оказывает существенное влияние на характер протекания переходного процесса в асинхронных машинах, особенно в машинах небольшой и средней мощности.

Закон изменения скорости или скольжения обычно принимается прямолинейным из соображений, что механическая инерция ротора сглаживает колебания скольжения. Это допущение справедливо во многих режимах (пуск, учёт изменения скорости при посадке напряжения и др.) в сравнительно большой части процесса, по крайней мере для некоторого отрезка времени [3].

При расчете рассматриваемых процессов методом последовательных интервалов учет активного сопротивления обмотки статора не вызывает заметных усложнений.

Для учета влияния изменения скорости можно на основании вышесказанного принять ускорение постоянным или найти приближенное выражение скольжения в зависимости от времени $s = f(t)$ из приближенной характеристики $M_e = f(s)$ по известному из общего курса электрических машин методу.

В статье Е. Я. Казовского [3] дается численный пример расчета электромагнитного вращающего момента при наличии постоянного ускорения ротора методом комплексных операторных уравнений. Ход расчета иллюстрируется таблицами.

Для более наглядного сравнения в отношении трудоемкости вычислительных операций при расчете электромагнитного вращающего момента методом последовательных интервалов воспользуемся машиной с параметрами [3]:

$$x_1 = x_2 = 3,07, \quad x_m = 2,99, \quad r_1 = r_2 = 0,01,$$

где в относительных единицах

$x_1 = L_1$ — индуктивность статора,

$x_2 = L_2$ — индуктивность ротора,

$x_m = M$ — взаимоиндуктивность,

r_1 и r_2 — активные сопротивления обмоток статора и ротора.

Рассмотрим режим ускорения, который соответствует разгону двигателя до номинальной скорости за 12 периодов, т. е. принимаем ускорение $2a = \frac{1}{12 \cdot 2\pi} = 0,01327$, тогда угловая скорость $\omega = 2at = 0,01327 t$.

Следует отметить, что при расчете методом последовательных интервалов весь ход расчета останется тем же самым, если ускорение не постоянно, а является, например, заданной (графически или аналитически) функцией времени.

Электромагнитный вращающий момент асинхронной машины определяется уравнением:

$$M_e = \frac{3}{2} x_m (i_\beta \cdot i_a - i_\alpha \cdot i_s), \quad (1)$$

где i_a и i_s — токи по продольной и поперечной осям статора трехфазной асинхронной машины, преобразованной в двухфазную;
 i_α и i_β — аналогично токи ротора, приведенные к частоте статора.

Для определения токов статора и ротора воспользуемся расчетными формулами [9]:

$$\begin{aligned} \Delta i_a &= \frac{AK_1 + BK_2 - CK_3 + DK_4}{K_9}, \\ \Delta i_s &= \frac{-AK_2 + BK_1 - CK_4 - DK_3}{K_9}, \\ \Delta i_\alpha &= -\frac{AK_5 + BK_6 - CK_7 + DK_8}{K_9}, \\ \Delta i_\beta &= -\frac{-AK_6 + BK_5 - CK_8 - DK_7}{K_9}. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя заданные значения параметров и выбранный промежуток времени $\Delta t = 0,523 \left(\frac{1}{12} \text{ периода или } \frac{1}{600} \text{ сек.} \right)$ в выражение для коэффициентов [9], получим:

$$x = \frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} = 5,875; \quad z = \frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} = 5,875,$$

$$y = \frac{M}{\Delta t} = 5,717; \quad u = \frac{M\omega}{2} = 0,0194 t;$$

$$v = \frac{L_2 \omega}{2} = 0,02037 t,$$

$$K_1 = z(xz - y^2) + v(xv - yu) = 10,76 + 0,0001273 t^2,$$

$$K_2 = y(uz - yv) = 0,000567 t,$$

$$K_3 = y(xz - y^2) = 10,47,$$

$$K_4 = y(xv - yu) = 0,03573 t,$$

$$K_5 = y(xz - y^2) + u(xv - yu) = 10,47 + 0,000124 t^2,$$

$$K_6 = x(uz - yv) = 0,000583 t,$$

$$K_7 = x(xz - y^2) = 10,76,$$

$$K_8 = x(xv - yu) = 0,0367 t,$$

$$K_9 = (xz - y^2)^2 + (xv - yu)^2 = 3,36 + 0,000039 t^2,$$

$$A = u_{am} - r_1 i'_a = u_{am} - 0,01 i'_a,$$

$$B = u_{sm} - r_1 i'_s = u_{sm} - 0,01 i'_s,$$

$$C = -r_2 i'_\alpha - L_2 \omega i'_\beta - M\omega i'_s = -0,01 i'_\alpha - \omega(3,07 i'_\beta + 2,99 i'_s),$$

$$D = -r_2 i'_\beta + L_2 \omega i'_\alpha + M\omega i'_a = -0,01 i'_\beta + \omega(3,07 i'_\alpha + 2,99 i'_a).$$

Для выполнения расчета составляем таблицу 1. В первый столбец таблицы заносим начальные условия. При синусоидальном приложенном напряжении, предполагая, что напряжение в момент включения в фазе α проходит через нуль, заполняем первые две строки до конца таблицы. При выбранном интервале времени можно заполнить также до конца таблицы следующие 9 строк. Эти операции, как следует из таблицы 1, не являются трудоемкими.

Таблица 1

1	u_{am}		0,255	0,695	0,949
2	u_{em}		0,949	0,695	0,255
3	$t + \frac{\Delta t}{2} = t_m$		0,262	0,785	1,308
4	$10,76 + 0,0001273 t_m^2 = K_1$		10,76	10,76	10,76
5	$0,000567 t_m = K_2$		0,00015	0,00044	0,00074
6	$0,0357 t_m = K_4$		0,0093	0,028	0,0467
7	$10,47 + 0,000124 t_m = K_5$		10,47	10,47	10,47
8	$0,000583 t_m = K_6$		0,00015	0,00046	0,00076
9	$0,0367 t_m = K_8$		0,0096	0,0288	0,048
10	$3,36 + 0,000039 t_m^2 = K_9$		3,36	3,36	3,36
11	$0,01327 t_m = \omega$		0,0035	0,0104	0,0173
12	$u_{am} - 0,01 i'_a = A$		0,255	0,687	0,919
13	$u_{em} - 0,01 i'_e = B$		0,949	0,665	0,204
14	$-0,01 i'_a - \omega (3,07 i'_\beta + 2,99 i'_e) = C$		0	0,0078	0,0286
15	$-0,01 i'_\beta + \omega (3,07 i'_a + 2,99 i'_e) = D$		0	0,0296	0,0496
16	$\frac{1}{K_9} (AK_1 + BK_2 - C \cdot 10,47 + DK_4) = \Delta i_a$		0,816	2,176	2,854
17	$\frac{1}{K_9} (-AK_2 + BK_1 - CK_4 - D \cdot 10,47) = \Delta i_\beta$		3,039	2,037	0,498
18	$-\frac{1}{K_9} (AK_5 + BK_6 - C \cdot 10,76 + DK_8) = \Delta i_\alpha$		-0,794	-2,116	-2,773

19	$-\frac{1}{K_9}(-AK_6+BK_5-CK_8-D.10,76)=\Delta i_\beta$		-2,957	-1,977	-0,477
20	$i'_a + \Delta i_a = i_a$	0	0,816	2,992	5,846
21	$i'_e + \Delta i_e = i_e$	0	3,039	5,076	5,574
22	$i'_\alpha + \Delta i_\alpha = i_\alpha$	0	-0,794	-2,910	-5,683
23	$i'_\beta + \Delta i_\beta = i_\beta$	0	-2,957	-4,934	-5,411
24	$M_e = 4,48 (i_\beta \cdot i_a - i_\alpha \cdot i_e)$		0,000	0,039	0,20

и т. д.

Для ускорения расчета можно пренебречь коэффициентами K_2 и K_6 , ввиду их незначительности в начальной части расчета, когда скорость вращения мала, и учесть их, когда они начнут оказывать влияние на величину приращения тока.

Для получения второго столбца подставляем начальные условия в выражения для A , B , C и D .

$$A = u_{am} - r_1 i'_a = u_{am};$$

$$B = u_{em} - r_1 i'_e = u_{em};$$

$$C = 0, D = 0,$$

где u_{am} и u_{em} — средние значения напряжения в интервале времени Δt .

Как указывалось [9], эти средние значения можно принимать, во-первых, как среднее арифметическое между напряжениями в начале интервала

$$u'_a = U \sin(\omega_1 t' + \alpha_0) = \sin \alpha_0 = 0,$$

$$u'_e = U \sin\left(\omega_1 t' + \alpha_0 + \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\alpha_0 + \frac{\pi}{2}\right) = 1$$

и напряжениями в конце интервала

$$u''_a = U \sin(\omega_1 t'' + \alpha_0) = \sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha_0\right) = 0,5,$$

$$u''_e = U \sin\left(\omega_1 t'' + \alpha_0 + \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{2}{3}\pi + \alpha_0\right) = 0,866,$$

$$\text{т. е. } u_{am1} = \frac{u'_a + u''_a}{2} = \frac{0 + 0,5}{2} = 0,25,$$

$$u_{em1} = \frac{u'_e + u''_e}{2} = \frac{1 + 0,866}{2} = 0,933,$$

где $U = 1$ — номинальное напряжение,

$\omega_1 = 1$ — угловая частота,

$\alpha_0 = 0$ — начальная фаза,

$t' = 0$ — время в начале интервала,

$t'' = \Delta t = \frac{\pi}{6}$ — время в конце интервала;

во-вторых, как действительное среднее значение, соответствующее моменту времени $t_m = t + \frac{\Delta t}{2}$,

$$u_{am2} = U \sin(\omega_1 t_m + \alpha_0) = \sin \frac{\pi}{12} = 0,259,$$

$$u_{sm2} = U \sin\left(\omega_1 t_m + \alpha_0 + \frac{\pi}{2}\right) = \sin \frac{7}{12} \pi = 0,966.$$

Практика расчета показывает, что более правильным значением для u_{am} будет среднее между средним арифметическим и действительным средним, т. е.

$$u_{am} = \frac{u_{am1} + u_{am2}}{2} = \frac{0,25 + 0,259}{2} = 0,255,$$

$$u_{sm} = \frac{u_{sm1} + u_{sm2}}{2} = \frac{0,933 + 0,966}{2} = 0,949.$$

Такое вычисление ни в коей мере не отражается на продолжительности расчета, так как при синусоидальном изменении напряжения при $\Delta t = \frac{1}{12}$ периода необходимо подсчитать всего три средних значения u_{am} для расчета всего процесса.

Определив A , B , C и D , находим приращения токов по уравнению (2) и токи по уравнениям (4):

$$\begin{aligned} i_a &= i'_a + \Delta i_a, \quad i_a = i'_a + \Delta i_a, \\ i_b &= i'_b + \Delta i_b, \quad i_b = i'_b + \Delta i_b, \end{aligned} \quad (4)$$

где i'_a , i'_b , i'_a и i'_b — значения токов в начале интервала.

По вычисленным значениям токов, пользуясь уравнением (1), определяем электромагнитный вращающий момент.

Далее приступаем к расчету следующего, третьего столбца, для которого начальными условиями будут служить вычисленные данные второго столбца, и т. д.

Как недостаток необходимо отметить, что при расчете часто оказывается недостаточно той точности, которую может гарантировать логарифмическая линейка, поэтому, чтобы избежать ошибки и уменьшить погрешность расчета, следует производить вычисления с помощью арифмометра.

Расчет электромагнитного вращающего момента асинхронной машины, работающей в режиме асинхронного тормоза при отрицательной синхронной скорости

Численное определение электромагнитного вращающего момента при включении асинхронной машины выполнено с помощью интеграла [10] для ряда соотношений параметров при вращении машины с отрицательной синхронной скоростью. Такие же расчеты были проделаны Е. Я. Казовским [4] на основании формул, полученных им с помощью комплексных операторных уравнений.

В статье [4] дано сравнение расчетной кривой переходного электромагнитного вращающего момента асинхронной машины, работающей в

режиме асинхронного тормоза, с кривой, полученной с помощью интеграла.

Для выполнения расчета рассматриваемого процесса методом последовательных интервалов необходимо знать основные параметры машины r_1, r_2, L_1, L_2 и M .

Для определения их воспользуемся данными машины одного из примеров [4]

$$\alpha_s = \alpha_r = 0,04036; \alpha'_s = \alpha'_r = 0,34; \sigma = 0,118.$$

Пользуясь известными соотношениями

$$T_s = \frac{1}{\alpha_s} = \frac{x_1}{r_1}, \quad T'_s = \frac{1}{\alpha'_s} = \frac{x'_1}{r_1} \quad \text{и} \quad \sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_1 x_2},$$

где T_s — постоянная времени обмотки статора при разомкнутой обмотке ротора,

T'_s — постоянная времени обмотки статора при замкнутой обмотке ротора, можно определить:

$$x_m = 0,94 x_1, \quad x_1 = x_2, \quad r_1 = r_2.$$

Так как приведенных в рассматриваемом примере данных недостаточно для нахождения численных значений параметров (не даны активные сопротивления), то придется ограничиться лишь качественным сравнением результатов расчета.

Примем: $x_1 = L_1 = 2$, тогда $x_m = M = 1,88$, $r_1 = r_2 = 0,0807$.

При отрицательной синхронной скорости $\omega = -1$.

Как и в предыдущем примере, выбираем интервал времени

$$\Delta t = 0,523 \left(\frac{1}{12} \text{ периода} \right).$$

Пользуясь выражениями (23) и (25) [9], вычисляем вспомогательные величины и расчетные коэффициенты:

$$x = \frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} = 3,864, \quad y = \frac{M}{\Delta t} = 3,595,$$

$$z = \frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} = 3,864, \quad u = \frac{M\omega}{2} = -0,94,$$

$$v = \frac{L_2 \omega}{2} = -1.$$

$$K_1 = z(xz - y^2) + v(xv - yu) = 8,268, \quad K_5 = y(xz - y^2) + u(xv - yu) = 7,696,$$

$$K_2 = y(uz - yv) = -0,137, \quad K_6 = x(uz - yv) = -0,147,$$

$$K_3 = y(xz - y^2) = 7,240, \quad K_7 = x(xz - y^2) = 7,783,$$

$$K_4 = y(xv - yu) = -1,743, \quad K_8 = x(xv - yu) = -1,874,$$

$$K_9 = (xz - y^2)^2 + (xv - yu)^2 = 4,291,$$

$$A = u_{am} - 0,0807 i'_a, \quad C = -0,0807 i'_a + 2 i'_\beta + 1,88 i'_s,$$

$$B = u_{em} - 0,0807 i'_s, \quad D = -0,0807 i'_\beta - 2 i'_a - 1,88 i'_s.$$

Подставляя значения коэффициентов в уравнения (2), получим расчетные формулы:

$$\Delta i_a = 1,927 A - 0,0319 B - 1,687 C - 0,406 D,$$

$$\Delta i_b = 0,0319 A + 1,927 B + 0,406 C - 1,687 D,$$

$$\Delta i_a = -(1,794 A - 0,0343 B - 1,814 C - 0,437 D),$$

$$\Delta i_b = -(0,0343 A + 1,794 B + 0,437 C - 1,814 D).$$

Для выполнения расчета составляем табл. 2.

Таблица 2

1	u_{am}		0,255	0,695	0,949	0,949	0,695	0,255
2	u_{bm}		0,949	0,695	0,255	-0,255	-0,695	-0,949
3	$u_{am} - 0,0807 i'_a = A$		0,255	0,658	0,823	0,748	0,399	-0,054
4	$u_{bm} - 0,0807 i'_b = B$		0,949	0,547	0,035	-0,474	-0,858	-1,021
5	$-0,0807 i'_a + 2 i'_b + 1,88 i'_b = C$		0	0,065	0,208	0,317	0,310	0,146
6	$-0,0807 i'_b - 2 i'_a - 1,88 i'_a = D$		0	0,121	0,116	-0,026	-0,242	-0,464
7	$1,927 A - 0,0319 B - 1,687 C - 0,406 D = \Delta i_a$		0,461	1,092	1,187	0,932	0,283	-0,14
8	$0,0319 A + 1,927 B + 0,406 C - 1,687 D = \Delta i_b$		1,837	0,899	-0,017	-0,717	-1,103	-1,128
9	$-1,794 A + 0,0343 B + 1,814 C + 0,437 D = \Delta i_a$		-0,425	-0,991	-1,046	-0,794	-0,193	-0,142
10	$-0,0343 A - 1,794 B - 0,437 C + 1,814 D = \Delta i_b$		-1,711	-0,814	0,028	0,639	0,947	0,928
11	$i'_a + \Delta i_a = i_a$	0	0,461	1,553	2,740	3,672	3,955	3,807
12	$i'_b + \Delta i_b = i_b$	0	1,837	2,736	2,719	2,002	0,899	-0,229
13	$i'_a + \Delta i_a = i_a$	0	-0,425	-1,414	-2,462	-3,256	-3,449	-3,307
14	$i'_b + \Delta i_b = i_b$	0	-1,711	-2,525	-2,497	-1,858	0,911	0,017
15	$M_e = -2,82 (i_b \cdot i_a - i_a \cdot i_b)$		0,020	0,133	0,416	0,858	1,468	1,95

и т. д.

Задаемся начальными условиями при $t=0$: $i'_a=0$, $i'_b=0$, $i'_a=0$, $i'_b=0$, $u'_a=0$ и $u'_b=1$ и заносим их в первый столбец табл. 2.

Ход расчета подробно разобран в предыдущем примере.

Если торможение происходит при переменной скорости и характер изменения скорости известен, то для расчета электромагнитного вращающего момента необходимо составить таблицу, подобную табл. 1,

в которую занести коэффициенты, зависящие от изменения скорости, и далее выполнять расчет таким же порядком, как это показано в рассматриваемых примерах.

Выводы

1. Расчет электромагнитного вращающего момента в асинхронных машинах при постоянной и переменной скорости вращения методом последовательных интервалов сводится к простым арифметическим и алгебраическим действиям при значительно меньшем количестве вычислительных операций по сравнению с другими аналитическими методами расчета. Точность расчета зависит как от принятых допущений, так и от величины выбранного интервала. Для практических расчетов можно принимать интервал времени $\Delta t = \frac{1}{12}$ периода и только в редких случаях, когда требуется большая точность, следует уменьшить интервал до $\Delta t = \frac{1}{18}$ периода.

2. При расчете методом последовательных интервалов приходится оперировать только с основными параметрами машины: активными сопротивлениями обмоток статора и ротора r_1 и r_2 , индуктивностями обмоток L_1 и L_2 и взаимоиндуктивностью статорной и роторной обмоток M . Учет активного сопротивления обмотки статора не вносит в расчетные уравнения заметных усложнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кантор Р. М. Анализ переходных процессов в асинхронных машинах. Бюллетень ВЭИ № 2, 1935.
2. Касьянов В. Т. Расчет процессов пуска, торможения, реверса и регулирования скорости и нагрузки электродвигателей постоянного тока. ВЭП № 10, 1944.
3. Казовский Е. Я. Обобщенное рассмотрение переходных режимов в асинхронных и синхронных машинах. Электросила, № 2—3, 1945.
4. Казовский Е. Я. Переходные процессы в асинхронных машинах при включениях и коротких замыканиях. Электричество, № 6, 1947.
5. Казовский Е. Я. Переходные процессы в асинхронных машинах при включениях и набросе нагрузки. ВЭП, № 2, 1949.
6. Зарецкий И. С. Исследование трехфазного асинхронного двигателя в переходных режимах. Техотчет ЛЭТИ, 1947.
7. Шубенко В. А., Пинчук И. С. Графический метод расчета переходных процессов в асинхронном двигателе. Электричество, № 2, 1950.
8. Янко-Триницкий А. А. Уравнения переходных электромагнитных процессов асинхронного двигателя и их решения. Электричество, № 3, 1951.
9. Сипайлов Г. А. Расчет процессов включения асинхронных машин методом последовательных интервалов. Известия ТПИ, том 72, 1952.
10. Gilfillan E. S., Kaplan E. L. Transient Torques in Squirrel-Cage Induction motors, With Special Reference to Plugging. Tr. AIEE т. 60, стр. 1200, 1941.